

## 法政大学学術機関リポジトリ

## HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

# 数値標高モデルによる道路縦断勾配を含む道路ネットワークの作成：燃料消費最少路線探索への適用

著者	大砂 裕樹
著者別名	OSUNA Hiroki
その他のタイトル	GENERATION OF A ROAD NETWORK INCLUDING THE GRADIENTS OF ROADS BY DIGITAL ELEVATION MODEL : APPLICATION TO FUEL CONSUMPTION MINIMUM PATH SEARCH
ページ	1-45
発行年	2016-03-24
学位授与年月日	2016-03-24
学位名	修士(工学)
学位授与機関	法政大学 (Hosei University)
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10114/12505">http://hdl.handle.net/10114/12505</a>

2015 年度 修士論文

数値標高モデルによる  
道路縦断勾配を含む道路ネットワークの作成  
～燃料消費最少経路探索への適用～

GENERATION OF A ROAD NETWORK INCLUDING  
THE GRADIENTS OF ROADS BY DIGITAL ELEVATION MODEL  
~APPLICATION TO FUEL CONSUMPTION MINIMUM PATH SEARCH~



法政大学大学院 理工学研究科

システム工学専攻 経営系 修士課程

14R6202 おおすなひろき 大砂裕樹

Hiroki OSUNA

指導教員：五島洋行 教授

## Abstract

In this research, we propose a method to generate a road network which includes the gradients of road segments. Using the generated network data, we search an optimal path that minimizes the fuel consumption. Path search calculates a path and length from a starting point to destination. However, maps commonly used for path search are two-dimensional, and information regarding gradients is not included. Since the speed of a vehicle is affected by gradients, the gradients of roads may influence on the selection of a path. We perform a path search considering the gradients of roads by generating a map that includes information regarding gradients. This would achieve a path search to save fuel consumption and to avoid uphill. We give an elevation value to each node by combining road network and Digital Elevation Model data. If the nodes at the endpoints of a link have different elevations, the link has a gradient. The fuel consumption along a link is calculated considering both the gradient and length of the link. The minimum fuel consumption path search calculates the fuel consumption for a single destination from all the other starting points. In the results of an experiment, the fuel consumption was saved approximately 7.8% in total compared with the conventional shortest path method. The elevations of the selected path are low compared with the shortest path. The proposed method can search paths with less fuel consumption than the shortest path because almost the entire paths had been changed.

# 目次

1. はじめに .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 先行研究 .....	1
1.3 研究目的 .....	2
2. 関連知識 .....	3
2.1 地理情報システム .....	3
2.2 測地系 .....	4
2.3 座標系 .....	4
2.4 標準地域メッシュ .....	5
2.5 座標変換 .....	6
2.6 点の多角形に対する内外判定 .....	8
3. 三次元リンクデータの作成手法 .....	9
3.1 数値地図 2500 .....	9
3.2 数値地図 50m メッシュ .....	9
3.3 各メッシュの座標の計算方法 .....	9
3.4 道路勾配の計算方法 .....	11
4. 経路探索手法 .....	12
4.1 ダイクストラ法 .....	12
4.2 ダイクストラ法的高速化 .....	13
4.2.1 完全二分木 .....	13
4.2.2 二分ヒープ .....	15
4.3 二分ヒープを用いたダイクストラ法 .....	19
5. 燃料消費最少経路探索 .....	21
5.1 道路勾配を用いた燃料消費量の決定手法 .....	21
5.2 分析対象地域 .....	22
5.3 実験概要 .....	24
5.4 実験結果 .....	24
6. 考察 .....	37
7. おわりに .....	40
参考文献 .....	41
謝辞 .....	42

# 1. はじめに

## 1.1 研究背景

近年，地図を用いたシステムやサービスが数多く提供されている．例えば，災害時の被害予測を地図化したハザードマップや，現在の降雨情報を地図上で確認できるサービスなどがあり，地図の使用用途は多岐にわたる．特に，カーナビゲーションシステム（以下，カーナビ）に代表される，目的地までの経路探索に地図が用いられることが多い．カーナビは 1980 年代から普及が始まり，1990 年には GPS(Global Positioning System)が搭載され，車両位置を特定する精度が向上し，1996 年には VICS(Vehicle Information and Communication System：道路交通情報システム)と呼ばれるサービスの登場により，道路の混雑状況を車内で知ることが可能になった．2002 年には通信モジュールを用いて地図情報の更新や，より詳しい混雑情報の取得が可能となるカーナビも登場した．2013 年には約 547 万台のカーナビが出荷されており，現在は乗用車のおよそ 7 割にカーナビが搭載されている[1]．カーナビなどのシステムで行われている経路探索では，出発地から目的地までの経路やその長さ，所要時間などの情報を得られるが，使用されている地図はそのほとんどが二次元地図である．実際の地形には起伏が存在するが，二次元の地図には起伏を表す情報は組み込まれていないため，道路に存在する道路縦断勾配（以下，道路勾配）を計算することができない．自動車走行において，自動車は上り坂では減速，下り坂では加速する[2]．それに伴いエンジンの回転数が変化し燃料消費量が増減する[3]ため，道路勾配は経路の選択に影響を及ぼすと考えられる．したがって，道路勾配を含んだ地図を作成することで，上り坂を回避した経路や，燃料消費量を節約した経路を選択することができるようになると考えられ，運送業における車両の燃料費の削減や，二酸化炭素排出量の削減などが期待できる．

## 1.2 先行研究

李ら[4]は道路勾配が自動車の燃料消費量に影響を与えることに着目し，道路勾配を考慮した経路を走行することによって発生する，燃料消費量の削減効果を定量的に分析した．なお，この論文では道路勾配を考慮した経路をエコルートと称している．ここでは，実車両走行によって瞬間燃費や瞬間速度を計測し，道路勾配ごとの燃料消費量の変化率を表した，瞬間燃費モデルを構築している．このモデルによって計算された，各道路の燃料消費量を用いて，最短経路とエコルートのそれぞれの経路長と燃料消費量を算出し，比較することで，エコルートの燃料節約率を計算している．実験によって，平坦な道を走行したときの燃費変化率を 0%とすると，上り坂では+300%程度，下り坂では

-45%程度、瞬間燃費が変化することが分かっている。また渋谷区を対象としたシミュレーション解析では、最短経路に対して、エコルートは燃料消費量を平均でおよそ 5% 節約できるとしている。

また、Kamal ら[5]は自動車の燃料消費は道路勾配の影響を受けることから、道路や地形、運動モデルなどの情報を用いることで、自動車に対する最適な制御入力を計算できるとして、道路勾配情報を用いた自動車の制御システムを提案した。ここでは、道路勾配の情報をデジタル地図から取得し、自動車の動きや、道路勾配によって発生する燃料消費の変化などをモデル化することで、自動車の入力および速度を制御する、エコドライビングシステムを構築している。実験では、提案されたシステムによって走行する自動車と、速度を固定して走行する自動車、速度を自動で制御する自動車を用いて、実際の道路を 2.5km 走行した。走行時の燃料消費量を比較した結果、提案されたシステムを用いて走行した自動車は、他の自動車よりも燃料消費量をおよそ 4%節約することができている。

### 1.3 研究目的

本研究では二次元の道路ネットワークに標高値を与え、道路勾配を含んだ道路ネットワークを作成する。具体的には、数値標高モデルと道路ネットワークを重ね合わせ、道路ネットワークの各リンクの両端ノードに、数値標高モデルの標高値を与える。リンクの両端ノードが標高値を持つことで、リンクの長さと両端ノードの標高差から、道路勾配が計算できる。

さらに作成された道路ネットワークを用いた経路探索の例として、燃料消費最少経路探索を行う。各リンクの道路勾配からリンクごとの燃料消費量を計算し、経路探索のコストとして扱うことで、出発地から目的地まで最も燃料消費が少ない経路を探索することができる。探索された経路と最短経路とを比較して、経路や経路長、燃料消費量の変化にどのような特徴があるかを考察する。

## 2. 関連知識

本章では、本研究で扱われる地理情報の関連知識について説明する。

### 2.1 地理情報システム

地理情報システム(Geographic Information System : GIS)とは、コンピュータ上で、現実空間の建物や道路などの、位置情報や属性情報を管理、統合、表示、利用するためのシステムである。地球上で起こる事象や活動は、位置という地理的な要素を持つことが多いため、地理情報システムは地理学や都市計画、環境保護など多くの分野で利用されている。道路や地形の標高、市区町村境界、人口分布など数多くのデータを取り扱うことができ、それら複数のデータを地図上に重ね合わせる事が可能である。そのため、重ね合わせた地図から、新たな事実や関係性を見つけることや、地域ごとに取った統計の比較や分析などを容易に行うことができる[6]。

地理情報のデータモデルは、ベクタデータとラスタデータの二つに大別される。地理情報のデータ内容によって使い分けられ、道路や河川、行政界などの、離散的な地理情報にはベクタデータ、標高や写真、土地利用情報など、連続的な地表面情報にはラスタデータが多く用いられている[7]。

#### ● ベクタデータ

ベクタデータは、ポイント、ライン、ポリゴンの三要素で構成されるデータモデルであり、それぞれが対応する属性情報を持っている。

ポイントデータは、特定の物の位置を表すために用いられるデータで、座標によって位置が示される。複数のポイントが存在する場合には、座標に番号を付与するなどして、ポイントそれぞれを区別する。

ラインデータは、ポイント同士をつなぐことによって表現され、河川や道路、鉄道を表す場合に用いられる。ラインの端点や結節点をノードと呼び、ポイントとは区別される。また、端点や結節点を連結する線をチェーンやアーク、リンクと呼ぶ。

ポリゴンデータは、三点以上のポイントをラインで結び、面を作ることによって表現される。ポリゴンは、土地利用データなど、閉じたラインの外側と内側を区別する際に用いられる。

ベクタデータによる地理情報は一般的に、地名、建物名などを表す文字や、各種統計情報の値が入力された、表形式の属性データと関連付けて表現される[7]。

#### ● ラスタデータ

ラスタデータは、地表をセルに分割し、セル内の情報を数値化することで、対象物の位置や形状を表現するものであり、規則正しく並べられた格子状のセルの集合体で表現される。セルはラスタデータが取り扱うデータの最小単位であり、それぞれが属性とし

て位置情報を持っている。ラスタデータは大別すると単純ラスタデータと複合ラスタデータに分けられる。

単純ラスタデータは、実データが存在するセルを 1、しないセルを 0 として、二種類の数字を用いて対象物を表現する。主に一種類の対象物をデータ化する際に用いられる。

複合ラスタデータは、0,1 以外の複数の数字を利用して、二種類以上の対象物をデータ化する際に用いられる。例えば、土地利用のラスタデータにおいて、1 を住宅地、2 を畑、3 を工業地帯といった形で用いられる。また、画像の濃淡やカラー写真の色階調にも用いられている[6][7]。

## 2.2 測地系

地球上の任意の位置を表現する際に、緯度と経度が用いられることがある。この緯度と経度を求めるための基準を測地系と呼び、日本においては日本測地系と世界測地系の二種類が用いられている。日本測地系は日本独自の測地系であるが、他国の測地系による座標値と一致していない。そこで日本では 2002 年 4 月 1 日から世界測地系へ移行し、以後の地図作成には世界測地系が用いられることとなった。

世界測地系は、地球全体に対して適用できる測地系で、準拠楕円体と測地座標系を組み合わせることで、地球上の任意の地点の緯度、経度を表現することができる。

準拠楕円体とは、ジオイドと呼ばれる平均海面で地球上を覆った状態を想定したものが、最もよく適合する回転楕円体で近似したものである。日本測地系ではベッセル楕円体を、世界測地系では GRS80 楕円体を準拠楕円体として採用している。

測地座標系とは、地球上の位置を経度、緯度、標高の三次元座標によって示すための直交座標系である。この座標系では、国際地球回転・基準系事業（IERS）が構築している ITRF（International Terrestrial Reference Frame：国際地球基準座標系）が主に用いられている。ITRF は IERS が世界中の宇宙測地データを平均して作成したもので、データの更新が続けられている[6][7]。

## 2.3 座標系

測地座標系は、地球上の位置を正確に表すことができる。しかし、経緯度の度分秒で表される間隔が同じでも、場所によって、メートルなどの距離の値が異なってしまう。例えば、経度 1 秒当たりの長さは、赤道付近で約 31m になるが、南極、北極では 0m となる。そこで、地球表面の曲面を二次元平面に置き換える方法として、投影座標系が考案された。これは、経緯度を平面上に投影した座標に変換する方法を定めたものである。



## ● UTM 座標系

ユニバーサル横メルカトル図法による投影を行い、北緯 84 度から南緯 80 度の間を 6 度ごとの経線で分割し、赤道と中央経線の交点を原点として設定した投影座標系を UTM 座標系と呼ぶ。それぞれのゾーンは、経度 180 度の線を始発線とし、西から東に向かって第 1 帯から第 60 帯と名付けられている。UTM 座標系では中央経線を X 軸としており、北方向を正としている。また、赤道を Y 軸としており、東方向を正としている。この座標系は世界中で利用されており、日本では都道府県単位の詳細作成など、10,000 分の 1 から 50,000 分の 1 程度の中縮尺の詳細作成に用いられる。

## ● 平面直角座標系

平面直角座標系は日本独自の座標系であり、500 分の 1 から 5,000 分の 1 程度の大縮尺地図の作成に用いられる、日本全土に 19 カ所の原点を設定し、それらの原点からの距離を XY 座標値として扱う座標系で、日本の公共測量で利用されることから公共測量座標系ともいわれる。設定される 19 カ所の原点は、投影時の誤差を少なくするように配置されている。対応する原点は、基本的に都道府県単位で設定されている。地域に対応した原点以外の原点を選択して地図を描画した場合、歪みが大きくなる。平面直角座標系では、X 軸は座標系原点において子午線に一致する軸となっており、真北に向かうと値が増加する。また、Y 軸は座標系原点において X 軸と直交する軸としているため、真東に向かうと値が増加する。なお、原点の座標は X 軸、Y 軸ともに 0m となっている [6][7]。

## 2.4 標準地域メッシュ

標準地域メッシュとは、一定間隔の経緯線によって地域を分割する方法の一つである。次の 1 から 4 の階層的な地域区画を用いて、全国を分割できる。

### 1. 第 1 次地域区画

全国を 1 度ごとの経線と 3 分の 2 度ごとの緯線によって分割した約 80km 四方の区画を第 1 次地域区画という。第 1 次地域区画の地域メッシュコードは 4 ケタからなり、上二桁は区画南端の緯度を 1.5 倍した数字、下二桁は西端経度から 100 を引いた数字として定義されている。例えば南端緯度が 36 度、西端経度が 138 度の地域メッシュコードは 5438 となる。

### 2. 第 2 次地域区画

第 1 次地域区画を経線、緯線方向にそれぞれ 8 等分した約 10km 四方の区画を第 2 次地域区画という。第 2 次地域区画の地域メッシュコードは第 1 次地域区画の地域メッシュコードに加え、第 1 次地域区画を 8 等分した区画に、経線方向は南から、緯線方向は西から、それぞれ 0 から 7 までの数字をつけ、これを経線方向、緯線方向の順に組み合わせた 2 桁の数字として定義されている。例えば、第 1 次地域区画の地域メッシュコー

ドが 5438 の第 2 次地域区画において、南から三つ目、西から四つ目の区画の地域メッシュコードは、5438-23 となる。

### 3. 第 3 次地域区画

第 2 次地域区画を経線、緯線方向にそれぞれ 10 等分した約 1km 四方の区画を第 3 次地域区画という。第 3 次地域区画の地域メッシュコードは第 2 次地域区画の地域メッシュコードに加え、第 2 次地域区画を 10 等分した区画に、経線方向は南から、緯線方向は西から、それぞれ 0 から 9 までの数字をつけ、これを経線方向、緯線方向の順に組み合わせた 2 桁の数字として定義されている。例えば、第 2 次地域区画の地域メッシュコードが 5438-23 の第 3 次地域区画において、南から四つ目、西から五つ目の区画の地域メッシュコードは、5438-23-34 となる。また、第 3 次地域区画は基準地域メッシュとも呼ばれており、国勢調査などの全国的なメッシュ情報はこの区画ごとの情報として記録されている。

### 4. 分割地域メッシュおよび統合地域メッシュ

分割地域メッシュは、基準地域メッシュを経線方向および緯線方向に 2 等分、4 四等分、または 8 等分することによって設定されている。

統合地域メッシュのうち、2 倍地域メッシュは第 2 次地域区画を経線および緯線方向にそれぞれ 5 等分、5 倍地域メッシュは第 2 次地域区画を経線および緯線方向にそれぞれ 2 等分することによって作られる[6][8]。

## 2.5 座標変換

経緯度で示される測地座標系の座標を、平面直角座標系に変換する方法を説明する。この変換で用いられる変数を下記のとおりである。ただし、 $i = 1, 2, \dots, 19$ である。

- $\lambda_i$  : 原点の経度
- $A$  : 卯酉線曲率半径
- $B$  : 赤道面から求点までの子午線弧長
- $a$  : 地球楕円体の長半径 6,377.397155km
- $b$  : 地球楕円体の短半径 6,356.078963km
- $e$  : 第一離心率
- $e'$  : 第二離心率

これらは経度を $\lambda$ 、緯度を $\phi$ とすると次のような式で計算される。

$$A = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (1)$$

$$B = a\{0.998329312962\phi - 0.00501415801 \sin \phi \cos \phi + 0.00001049328(\sin \phi \cos^3 \phi - \sin^3 \phi \cos \phi) \dots\} \quad (2)$$

$$e = \sqrt{\frac{(a^2 - b^2)}{a^2}} \quad (3)$$

$$e' = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b^2}} \quad (4)$$

今，平面直角座標系の原点の経緯度を $(\lambda_i, \phi_i)$ とすれば，変換する地理座標 $(\lambda, \phi)$ に対応する平面直角座標系の位置 $(X, Y)$ は式(5)のように計算される．ただし， $i = 1, 2, \dots, 19$ である．

$$\begin{aligned} X &= 0.9999g \\ Y &= 0.9999f \end{aligned} \quad (5)$$

ここで， $g$ と $f$ は次の式(6)(7)で計算される．

$$\begin{aligned} f &= Ad \cos \phi \left[ 1 + \frac{1}{6} d^2 \cos \phi \left\{ (1 - t^2 + \gamma^2) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{20} d^2 \cos^2 \phi (5 - 18t^2 + t^4 + 14\gamma^2 - 58t^2\gamma^2) \right\} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} g &= (B - B_i) + \frac{1}{2} Ad^2 \sin \phi \cos \phi \left[ 1 + \frac{1}{12} d^2 \cos^2 \phi \left\{ (5 - t^2 + 9\gamma^2 + 4\gamma^4) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{30} d^2 \cos^2 \phi (61 - 58t^2 + t^4 + 270\gamma^2 - 330t^2\gamma^2) \right\} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

また $B_i$ は赤道から平面直角座標系の 19 座標の原点までの子午線の弧長で，原点経度 $\phi_i$ をラジアン単位に変換した値によって計算されている．なお，式(6)(7)の計算で用いられる $d$ ， $t$ ，および $\gamma$ は式(8)によって計算される[8]．

$$\begin{aligned} d &= \lambda - \lambda_i \\ t &= \tan \phi \\ \gamma^2 &= e' \cos^2 \phi \end{aligned} \quad (8)$$

## 2.6 点の多角形に対する内外判定

各ノードがどのメッシュ内に存在するかを判定するには, **even-odd rule algorithm** を用いる. このアルゴリズムは, 図 1 のように判定するノードからある方向に直線をのばし, 判定したいメッシュの辺と何度交差するかによって, メッシュ内にノードがあるかを判定するものである. ノード  $u_1$  のように, のばした直線とメッシュの辺との交差回数が, 奇数回であればメッシュの内側に, ノード  $u_2$  のように偶数回であればメッシュの外側にノードが存在すると判定する.

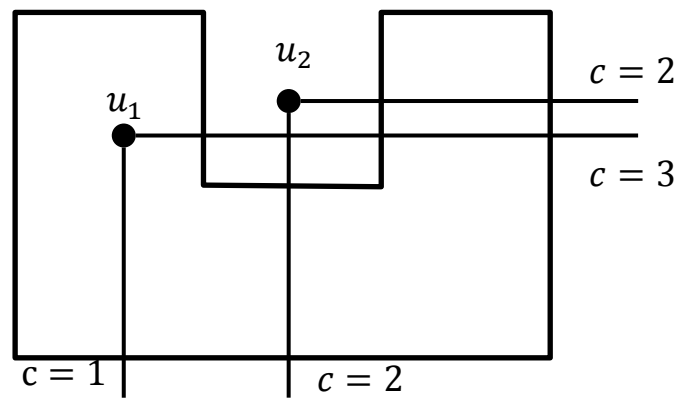


図 1 even-odd algorithm の例

### 3. 三次元リンクデータの作成手法

数値地図 2500（空間データ基盤）から得られる道路線を用いたリンクデータと、DEM データから得られる各地点の標高値を重ね合わせ、リンクデータのリンクの両端のノードに標高値を与える。リンクの両端のノードが異なる標高値を持てば、そのリンクには勾配が発生することになる。この勾配とリンクの長さによって、新しいコストの値を決定する。

#### 3.1 数値地図 2500

数値地図 2500（空間データ基盤）は、国土交通省国土地理院より刊行されている、縮尺 2,500 分の 1 のデジタル地図である。この地図は道路線や行政区画などをベクトル形式で表している。

#### 3.2 数値地図 50m メッシュ

数値地図 50m メッシュ（標高）は、国土交通省国土地理院より刊行されている標高データである。25,000 分の 1 地形図を緯度・経度方向にそれぞれ 200 等分し、得られた実距離およそ 50m 四方のメッシュの中心点の標高値が記録されている。この数値標高モデルをここでは DEM（Digital Elevation Model）データと呼ぶことにする。このデータは標高値のみが記録されており、行政区画や等高線などの他の要素は含まれていない。また、座標は元となる 2 次メッシュの座標のみ含まれており、メッシュごとの座標は含まれていない。

#### 3.3 各メッシュの座標の計算方法

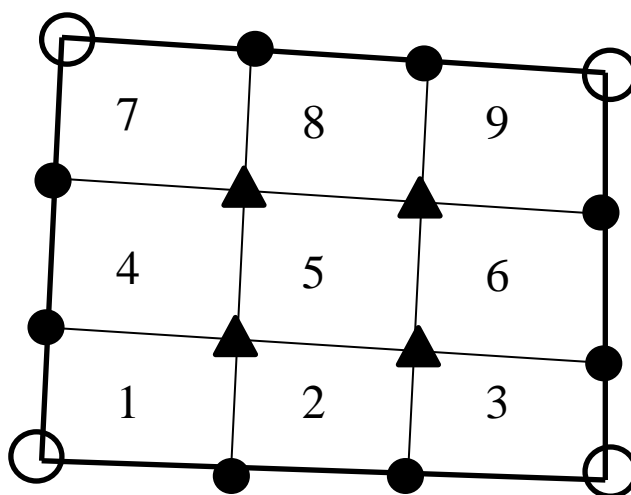
使用する DEM データには 2 次メッシュの四隅の座標のみが含まれている。そのため、各メッシュの四隅に座標を与えるためには、2 次メッシュの座標から計算を行う必要がある。ただし、平面直角座標系では球面を平面にする際に補正を行うため、DEM データのメッシュは正方形でも長方形でもない四角形になっている。そのため、DEM データのメッシュの辺の傾きを考慮して、メッシュの四隅に座標を与える必要がある。

小規模な DEM データを例に、以下に座標計算の説明をする。図 2 のような 3×3 の DEM データがあるとする。メッシュごとに振り分けられている番号はメッシュ番号とする。図中の白丸は 3.2 のとおり、2 次メッシュの座標が含まれているため、この点の座標は既に与えられている。また、この DEM データの外周上に存在する黒丸の点の座標は、DEM データ全体の四隅の座標と、DEM データの縦横のメッシュ数から計算でき

る．例えば，図中のメッシュ番号 8 の左上の座標は，DEM データ全体の左上の座標を  $(y_{lt}, x_{lt})$ ，右上の座標を  $(y_{rt}, x_{rt})$  とすると

$$(y_{lt} + \frac{y_{rt} - y_{lt}}{3}, x_{lt} + \frac{x_{rt} - x_{lt}}{3})$$

と表すことができる．しかし，図 2 における 5 のメッシュの四隅の座標は上記のように求めることはできない．これは，DEM データが正方形，長方形でないため，5 のメッシュの四角形の四辺の傾きが不明であるためである．このようなメッシュの座標は，既に計算された座標を用いて，二直線の交点から座標を求めることにする．例えば，図中のメッシュ番号 5 の左上の座標は，メッシュ番号 4 の左上の座標とメッシュ番号 6 の右上の座標を結んだ直線と，メッシュ番号 2 の左下の座標とメッシュ番号 8 の左上の座標を結んだ直線の交点の座標と等しい．そのため，これら二直線の交点を求めることで，メッシュ番号 5 の左上の座標を求めることができる．



- : DEM データより既知の点
- : ○とメッシュの数から求まる点
- ▲ : ●を通る直線の交点で求める点

図 2 各メッシュに与える座標計算の例

### 3.4 道路勾配の計算方法

道路勾配には一般的にパーセント[%]が使用されている．これは水平方向に 100m 進んだときの標高の変化を表しており，水平方向に 100m 進んだときに，標高が 1m 高くなれば道路勾配が 1%としている．今，垂直距離を $\Delta y$ ，水平距離を $\Delta z$ とすると，道路勾配 $g$ は次の式(9)になる[9]．

$$g = \frac{\Delta y}{\Delta z} \times 100[\%] \quad (9)$$

したがって，式(9)より，リンクの両端ノードの標高差を $\Delta y$ ，リンクの長さを $\Delta z$ とすることで，リンクの道路勾配 $g$ を求めることができ，ネットワーク上の全てのリンクに適用することで，道路勾配を含んだ道路ネットワークを作成することができる．

## 4. 経路探索手法

### 4.1 ダイクストラ法

ダイクストラ法とは、1959年にエドガー・ダイクストラによって提案された最短経路問題を解くためのアルゴリズムである。グラフ内のすべてのリンクコストが非負であれば有向、無向グラフのどちらでも適用可能で、出発地のノードからネットワーク内の他のノード全てに対する最短経路とその総コストが求まる。今、グラフ  $G = (V, E)$  が存在する。ノード集合を  $V$ 、リンク集合を  $E$  として、リンクの始点ノードを  $i$ 、終点ノードを  $j$  とする。ただし、 $i, j \in V, (i, j) \in E$  である。また  $i$  から  $j$  へのリンクコストを  $w_{ij}$  とし、始点から点  $j$  へのコストの総和を  $d_j$  とする。計算を始める始点ノードは **start-point** とし、ノード  $j$  への経路を記憶する変数を  $f_j$  とする。そして  $V$  の部分集合を  $X$  とする。以下に他の全てのノードへの最短経路を求めるダイクストラ法の計算手順を示す[10]。

手順1. 初期設定

$$d_{\text{start-point}} \leftarrow 0$$

$$d_j \leftarrow \infty \text{ (始点以外のノードまでの距離に「}\infty\text{」の値を代入する)}$$

$$i \leftarrow \text{start-point}$$

$$X \leftarrow V - \{\text{start-point}\}$$

手順2. ノードまでのリンクコストの計算と比較

$$w_{ij} < \infty \text{ (ただし } (i, j) \in E \text{) である全ての } j \in X \text{ に対して,}$$

$$d_j > d_i + w_{ij} \text{ ならば, } d_j \leftarrow d_i + w_{ij}, f_j \leftarrow i \text{ とする.}$$

手順3. 部分集合  $X$  に含まれる最小の値を持つノードを求める

$$d_{j_0} \leftarrow \min_{j \in X} d_j \text{ (} j_0 \in X \text{) となる } j_0 \text{ を求める.}$$

手順4. 繰り返し

$X \leftarrow X - \{j_0\}$  を行う。もし、 $X = \phi$  ならば全ての探索が終了したことを表す。そうでない場合、 $i \leftarrow j_0$  とし、手順2. から手順4. の処理を繰り返す。

また、このダイクストラ法の計算量は  $O(V^2)$  である。



## 4.2 ダイクストラ法の高速化

前項で示した通り、ダイクストラ法の計算量は $O(V^2)$ であるため、ノード数が増加すると、計算量が急激に増えてしまう。したがって、本研究で扱うノード数約 36 万点、リンク数約 48 万本の神奈川県の道路ネットワークのような、大規模なネットワークに対しては適用することが難しいため、アルゴリズムの高速化が不可欠である[11]。本研究では、ダイクストラ法の次探索点の決定に二分ヒープを適用し、ダイクストラ法の高速化したもので実験を行う。この項では、文献[12]を参考に、二分ヒープに使われる完全二分木とヒープについて説明する。

### 4.2.1 完全二分木

まず木について説明する。木はデータを階層的に表現するデータ構造で、図 3 のようにノードと枝によって表現される。以下に木に使われる用語を示す。

- 親：枝で結ばれたノード間の上位ノード。
- 子：枝で結ばれたノード間の下位ノード。
- 兄弟：同じ親を持つノード同士。
- 根：親を持たないノード。
- 葉：子を持たないノード。
- 深さ：根からノードまでの枝の数。
- 高さ：最も深いノードの深さ

また、兄弟関係の順序を区別する木を順序木、区別しない木を無順序木という。

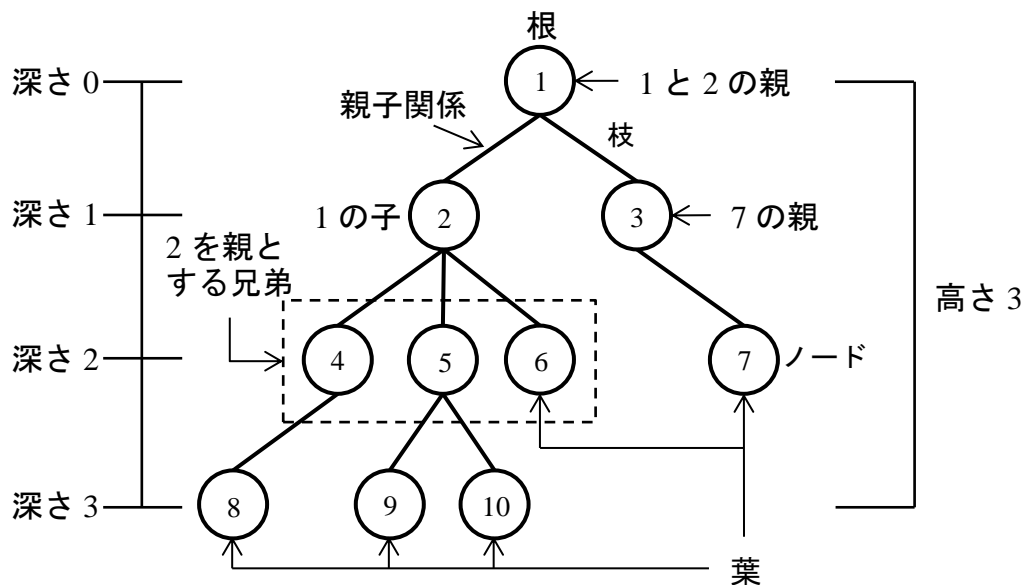


図 3 木構造の例と用語

木は複数の木が一つの根に束ねられて構成されているともいえる．ここに  $k$  個の木  $T_i \{i = 1, 2, \dots, k\}$  がある．木  $T_i$  の根をノード  $n_i \{i = 1, 2, \dots, k\}$  としたとき，ノード  $n$  をノード  $n_i$  の親となるように枝を結ぶことで，図 4 のような新しい木  $T$  が得られる．このとき， $T_i \{i = 1, 2, \dots, k\}$  を  $T$  の部分木という．

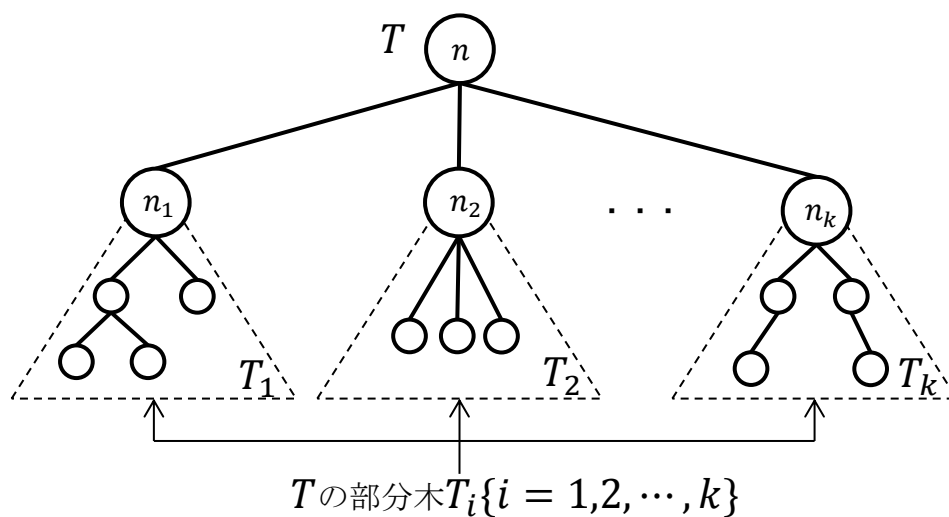


図 4 部分木の例

二分木とは各ノードが二つの子を持つ，図 5 のような順序木のことである．各ノードの子は左と右に分けられ，左側を左の子，右側を右の子という．親ノードは片方，もしくは両方の子を持っていない場合もある．あるノードに対して，左の子が根となる部分木を左部分木，右の子が根となる部分木を右部分木という．

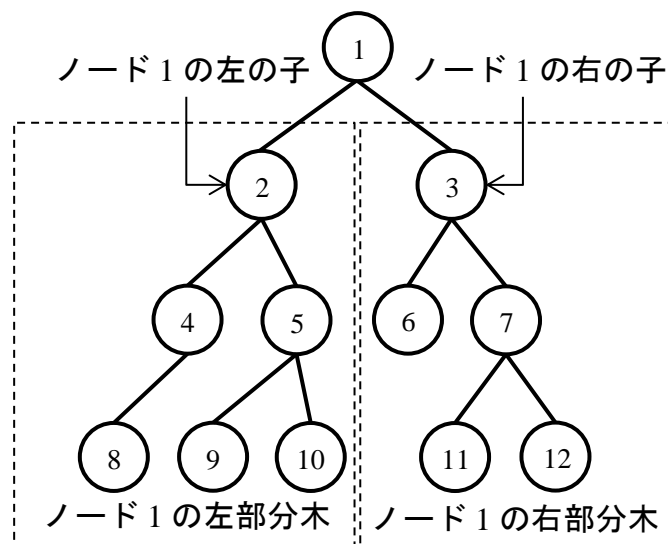


図 5 二分木の例

二分木の中で以下の二つを満たす木を完全二分木という。

- 最深でない位置は、ノードが全て詰まっている。
- 最深の位置にあるノードは、左から順に詰められている。

完全二分木は図 6 のような状態の木であり、図の順のように番号を割り振ることで、あるノード番号 $i$ に対して、左の子の番号は $2i$ 、右の子の番号は $2i + 1$ という規則性が成り立つ。これらを用いることで、完全二分木は一次元配列のみで記録することが可能である。

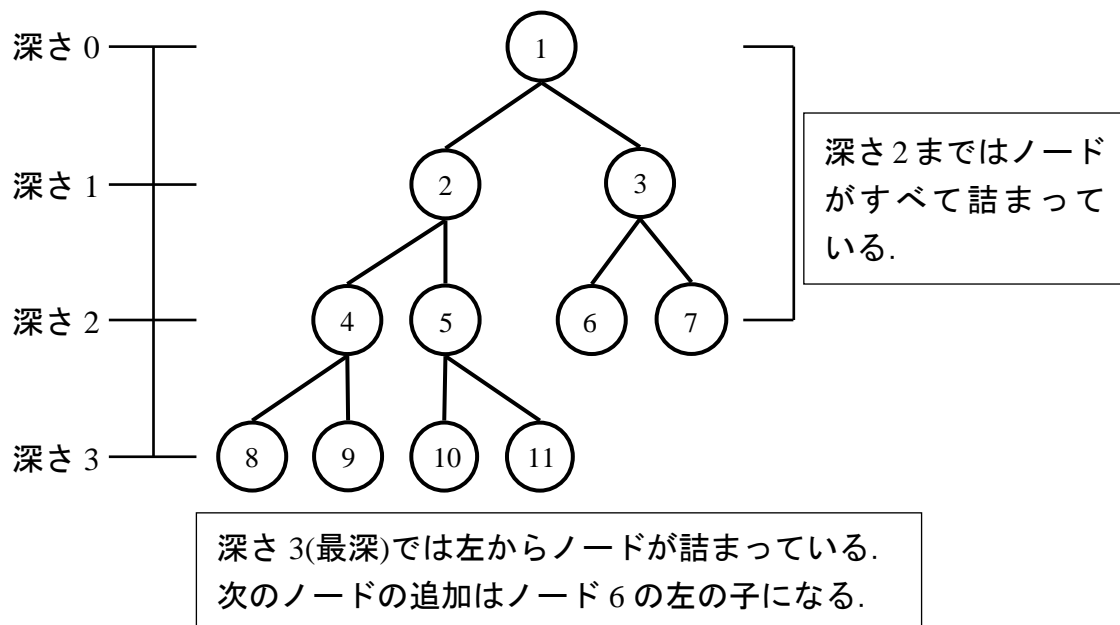


図 6 完全二分木の例

#### 4.2.2 二分ヒープ

ヒープとは、親と子が持つ値を比較し、全ての親子関係において親の値の優先度が高いという条件を満たす木のことで、完全二分木を使って作られるヒープのことを二分ヒープと呼ぶ。優先される値は適用する問題によって異なり、根に最大値を与えたければヒープの制約条件を親の値 $\geq$ 子の値、最小値を与えたければ親の値 $\leq$ 子の値とする。完全二分木をヒープ化することで、木のノードの中で最優先のノードを根に与えることができる。図 7 にノード内の数字を値、ノード右上の数字をノード番号としたヒープの例を示す。図 7 は根が最小値となるようなヒープであり、どの親子関係においても親の値 $\leq$ 子の値となっている。また、二分ヒープは完全二分木を用いているため、あるノード番号を $i$ に対して、親のノード番号は $\lfloor i/2 \rfloor$ 、左の子のノード番号は $2i$ 、右の子のノード番号は $2i + 1$ となる。

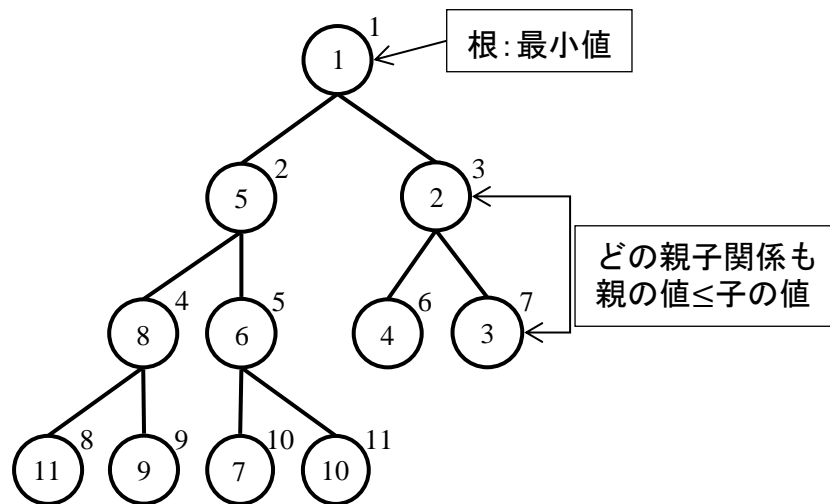


図 7 ヒープの例

完全二分木のヒープ化は，最も深い位置にある部分木をヒープ化し，ヒープ化をする範囲を順に拡大することによって行われる．このとき，以下の手順を利用することで，完全二分木の全体をヒープ化することができる．以下の手順は，根の左右の部分木が，同じヒープの制約条件のもとでそれぞれヒープ化されている完全二分木において，根を含めて木全体をヒープ化するものである．

- 手順1. 根と左右の子を比較し，より優先度が高い値を持った子があれば，親子関係を交換する．親の値の優先度が高ければ終了する．
- 手順2. 移動させたノードを自身の左右の子と比較し，より優先度が高い値を持った子と親子関係を交換する．
- 手順3. 手順 2. を以下のいずれかを満たすまで繰り返す．
  - 親の値の優先度が子の値の優先度よりも高いとき．
  - 葉に達したとき．

上記の手順のここでは部分ヒープ化と称する．手順の例を図 8 に示す．この例は，根の左右の子を根とする部分木が，ヒープの制約条件を親の値  $\leq$  子の値として既にヒープ化されており，根の値 7 を含めて木全体をヒープ化するものである．

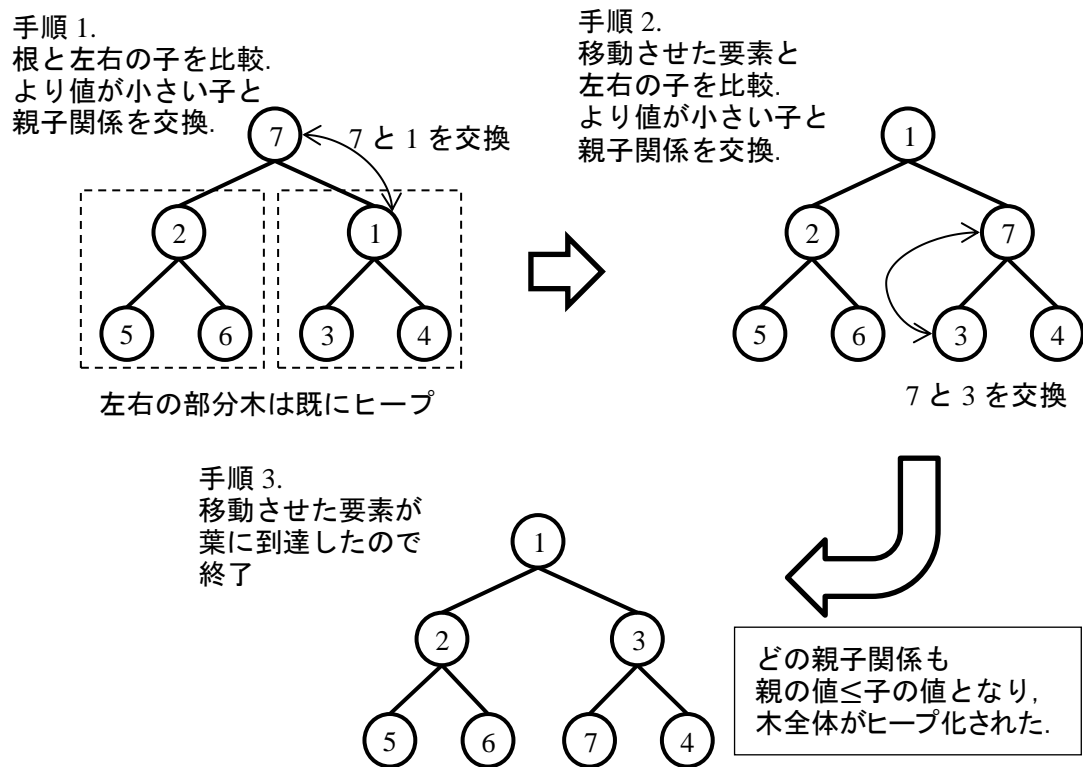


図 8 部分ヒープ化の手順例

上記の部分ヒープ化を利用した、木全体をヒープ化する手法は以下の手順で行う。ただし、木のノードの数を $n$ とする。

手順1.  $i \leftarrow \lfloor n/2 \rfloor$ とし、ノード番号 $i$ を根とする部分木を、部分ヒープ化する。

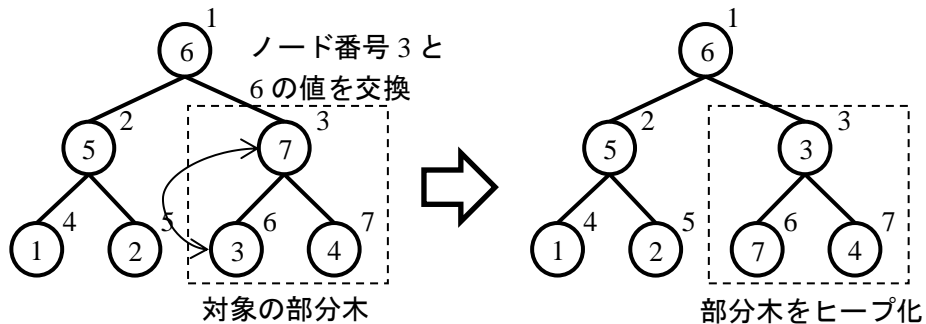
手順2.  $i \leftarrow i - 1$ とし、ノード番号 $i$ を根とする部分木を、部分ヒープ化する。

手順3. ノード番号 1 を部分ヒープ化するまで、手順 2.を繰り返す。

木全体をヒープ化する手順の例を図 9 に示す。ただし、ノード内の数字を値、ノードの右上の数字はノード番号を表し、ヒープの制約条件は親の値  $\leq$  子の値としている。

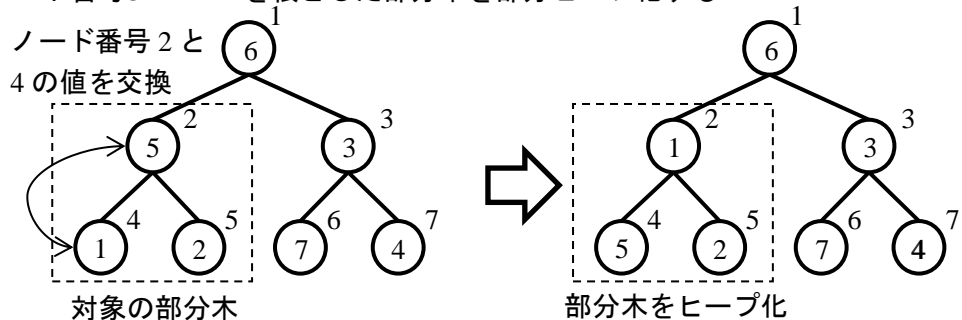
手順 1.

ノード番号  $\lceil 7/2 \rceil = 3$  を根とする部分木を、部分ヒープ化する。



手順 2.

ノード番号  $3 - 1 = 2$  を根とした部分木を部分ヒープ化する。



手順 3.

手順 2. の繰り返し。

ノード番号 1 を根とした部分木（木全体）を部分ヒープ化し、終了する。

- a. ノード番号 1 と 2 の値を交換
- b. ノード番号 2 と 5 の値を交換

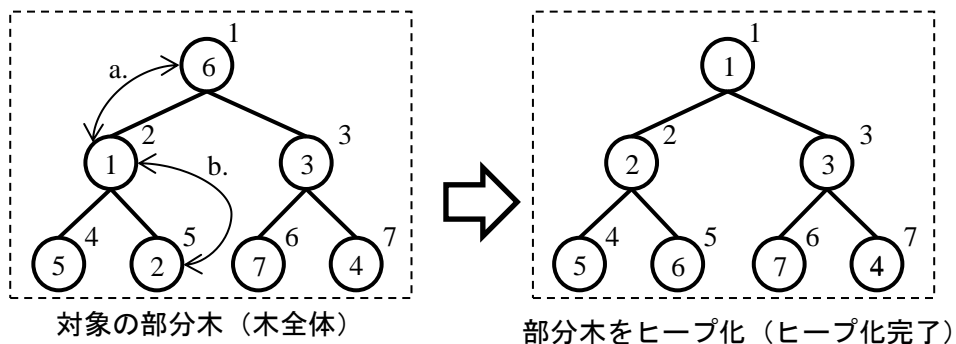


図 9 木全体のヒープ化手順例

### 4.3 二分ヒープを用いたダイクストラ法

ダイクストラ法では、次探索点の候補を、経路が確定していない全てのノードから選択していたため、大規模なネットワークの探索に適用することが難しかった。この次探索点の決定手法に二分ヒープを適用することで、ダイクストラ法を高速化する。

二分ヒープを用いたダイクストラ法の手順を以下に示す[11]。ただし、使われる記号は4.1に準じ、二分ヒープに使われる完全二分木を $B$ とする。また、始点から点 $j$ へのコストの総和 $d_j$ を距離ラベルと称する。

手順1. 初期設定

$$d_{\text{start-point}} \leftarrow 0$$

$$d_j \leftarrow \infty (\text{始点以外のノードまでの距離に「}\infty\text{」を代入する})$$

$$f_j \leftarrow 0 (j \in V)$$

$\text{start-point} \in V$ を、 $d_{\text{start-point}}$ を優先度として、 $B$ に挿入する。

手順2. ヒープ化

完全二分木 $B$ を、距離ラベル $d_j$ を優先度とし、親の値 $\leq$ 子の値となるようにヒープ化する。完全二分木 $B$ の根が $\min_{j \in B} d_j$ となる。

手順3. 次探索点の選択

二分ヒープ $B$ の根を取り出し、 $i \leftarrow j (j \in B)$ とする。

根が取り除かれたので、 $B$ の最も深く、最も右側に位置する点 $j \in B$ を $B$ の根に置く。

手順4. ノードまでのリンクコストの計算と比較

全ての $(i, j) \in E$ に対して、

$$d_j > d_i + w_{ij} \text{ならば、} d_j \leftarrow d_i + w_{ij} \text{とし、}$$

このとき、さらに $f_j = 0$ ならば $j \in V$ を距離ラベル $d_j$ を優先度として $B$ の最も深い位置に左詰めで挿入し、そうでないなら $j \in B$ の距離ラベル $d_j$ を $d_i + w_{ij}$ に更新する。

手順5. 繰り返し

$f_j \leftarrow i$ とし、 $B = \phi$ ならば終了する。そうでない場合、手順2.から手順5.の処理を繰り返す。

二分ヒープを用いたダイクストラ法の終了条件は二分ヒープから要素が無くなったときとなる。また、ダイクストラ法は1対全最短経路問題を解くアルゴリズムであるが、1対1最短経路問題も効率的に解くことが可能である。このとき、アルゴリズムの終了

条件は，終点 $t \in V$ が手順 3.で探索点 $i$ になるときである．なお，二分ヒープを用いることで，ダイクストラ法の計算量は $O((V + E) \log V)$ となる[11].



## 5. 燃料消費最少経路探索

本章では，提案した手法を用いて作られる道路勾配を含んだリンクデータを用いて，燃料消費最少経路探索の計算実験を行う．経路探索には第4章で示した二分ヒープを用いたダイクストラ法を用いる．

### 5.1 道路勾配を用いた燃料消費量の決定手法

道路勾配による燃料消費量の変化率は，文献[4]で提案されている瞬間燃費変化率モデルを引用する．このモデルは，道路勾配 0%の平坦地を走行したときの瞬間燃費を 40.9[km/L]とし，道路勾配によって燃料消費量が変化するモデルとなっている．図 10 に瞬間燃費変化率モデルを示す．なお，図中の式の $Y$ は瞬間燃費変化率[%]を， $G$ は道路勾配[%]を表す．

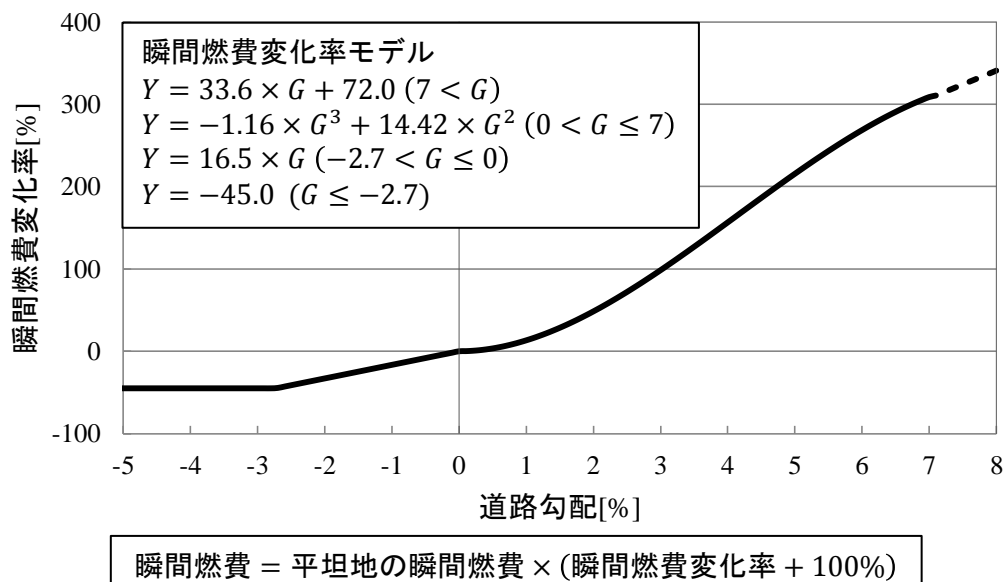


図 10 瞬間燃費変化率モデル(文献[4]を参考に作成)

このモデルでは，道路勾配を 4 種類に分け，各道路勾配に対応した式を当てはめて，瞬間燃費変化率を計算する．道路勾配が 3%の道路の瞬間燃費変化率は，図 10 中の式より

$$Y = -1.16 \times 3^3 + 14.42 \times 3^2 = 98.46[\%]$$

となり，平坦地と比べるとおよそ 2 倍多く，燃料を消費することになる．これに対して，勾配が -2%の場合には

$$Y = 16.5 \times (-2) = -33[\%]$$

となるので，平坦地と比べておよそ 66%の燃料消費で済むことになる．

## 5.2 分析対象地域

分析の対象となる地域は神奈川県全域とし，数値地図 2500（空間データ基盤）関東-4 に収録されている，神奈川県の道路線のデータを用いた道路ネットワークを，リンクデータとして用いる．このリンクデータのノード数は 360,667，リンク数は 477,429 である．図 11 にリンクデータによって作られる神奈川県全域の道路ネットワークを示す．また表 1 にこの道路ネットワークの情報を示す．

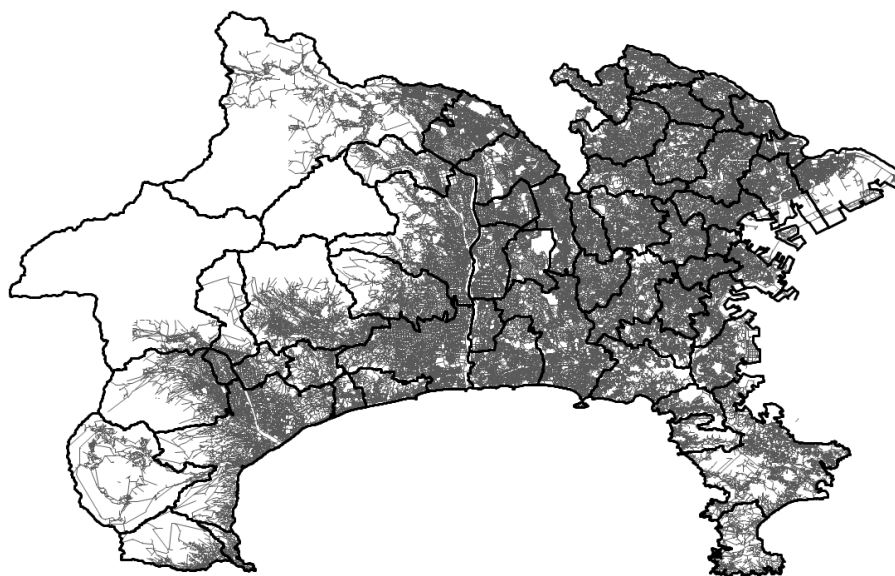


図 11 神奈川県の道路ネットワーク（太線は市区町村境界線）

表 1 神奈川県の道路ネットワークの道路の長さ

道路本数	総延長[km]	道路長さ 平均[m]	50m 以下 の道路数	50m 以下の 道路が占め る割合[%]
477,430	28,429.378	59.55	266,416	55.8

この道路ネットワークに DEM データを重ね合わせ，ノードに標高値を与える．使用した DEM データを図 12 に示す．また，使用した DEM データの四隅の座標を表 2 に示す．

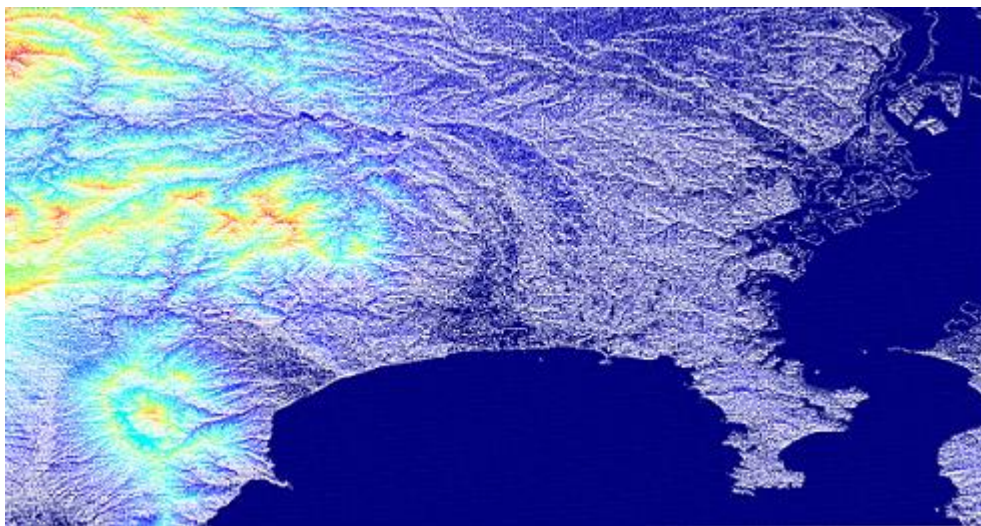


図 12 神奈川県 DEM データ

表 2 使用した DEM データの四隅の座標(平面直角座標系 第Ⅸ系)

	Y 座標[m]	X 座標[m]
左上	-86,951.7703	-26,952.6102
右上	3,474.2003	-27,378.2330
左下	-87,671.0943	-100,908.0240
右下	3,505.4681	-101,324.0406

また，道路ネットワークと DEM データを重ね合わせ作成した，道路勾配を含んだ道路ネットワークは，表 3 のような性質を持つリンクがある．

表 3 作成した道路ネットワークが持つリンクの性質と本数

	勾配がある	リンクが一つのメッシュ内に収まっている	両端ノードのメッシュは異なるが標高値は同じ	勾配がない
本数	244,745	20,733	214,978	232,684
割合[%]	51.3	43.4	45.0	48.7

### 5.3 実験概要

リンクごとに計算した燃料消費量を用いて、燃料消費量が最少となる経路を探索する。実験では、目的地を固定し、他の全てのノードを始点とする N 対 1 探索を行う。目的地は足柄郡箱根町芦之湯二タ子上二子山山頂付近とする。始点一つに対し、目的地までの最短経路探索と燃料消費最少経路探索を行い、それぞれの経路長と、そのときの燃料消費量を計算する。得られた最短経路と燃料消費最少経路を、燃料消費量や経路長について分析する。

### 5.4 実験結果

- 全経路の燃料消費量の節約率

目的地と接続がある、有効なノードペア数は 359,470 であった。また、この中で、最短経路と燃料消費最少経路が一致した始点の数は 848 であった。表 4 に有効なノードペア全体の燃料消費量の合計と節約率を示す。

表 4 有効なノードペアの総燃料消費量と節約率

最短経路 走行時 [L]	燃料消費最少 経路走行時 [L]	ネットワーク全体の 燃料消費節約率[%]
978,094.32	901,948.67	7.79

- 燃料消費を節約した経路の例 1

燃料消費を節約した経路について、川崎市高津区溝の口駅付近を始点とする経路を示す。表 5 に始点から目的地までの各種計算結果を示す。表中の 1km 当たりの減少量は、延長距離に対する消費の減少量を、節約率は燃料消費最少経路を通ることで抑えられる燃料量の割合である。また、図 13 にこの経路探索の結果を、図 14 に最短経路の標高推移を、図 15 に燃料消費最少経路の標高推移をそれぞれ示す。

表 5 溝の口駅付近を始点とする各経路の情報

最短経路 距離[km]	最短経路 消費量[L]	消費最少経 路距離[km]	消費最少 消費量[L]
79.34	3.507	83.16	3.234
延長距離 [km]	消費減少 量[L]	1km 当たりの 減少量[L/km]	節約率[%]
3.82	0.273	0.071	7.78%

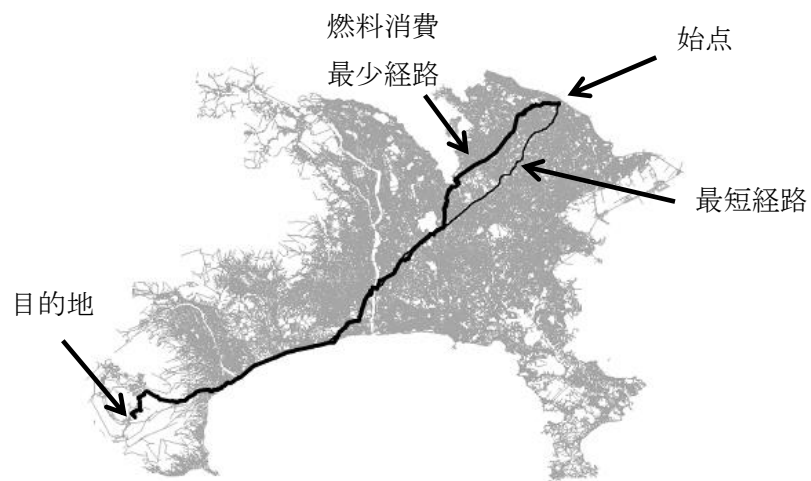


図 13 溝の口駅付近を始点とする各経路探索の経路

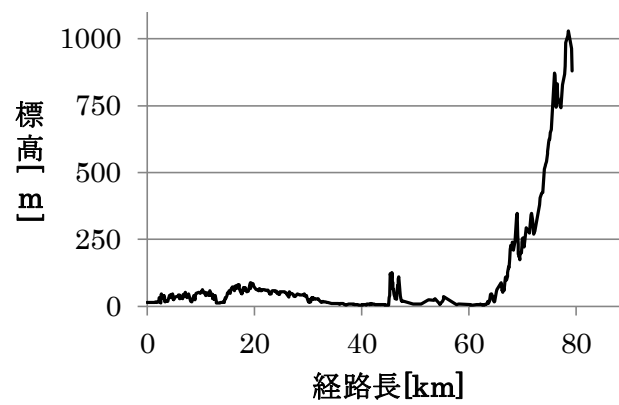


図 14 溝の口駅付近を始点とする最短経路の標高推移

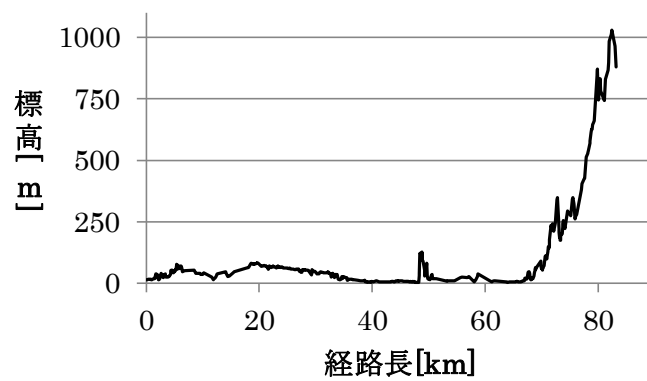


図 15 溝の口駅付近を始点とする燃料消費最少経路の標高推移

● 燃料消費を節約した経路の例 2

燃料消費を節約した経路について、横須賀市浦賀、浦賀駅付近を始点とする経路を示す。表 6 に始点から目的地までの各種計算結果を示す。また、図 16 にこの経路探索の結果を、図 17 に最短経路の標高推移を、図 18 に燃料消費最少経路の標高推移をそれぞれ示す。

表 6 浦賀駅付近を始点とする各経路の情報

最短経路 距離[km]	最短経路 消費量[L]	消費最少経 路距離[km]	消費最少 消費量[L]
74.08	3.571	79.05	3.293
延長距離 [km]	消費減少 量[L]	1km 当たりの 減少量[L/km]	節約率[%]
4.97	0.278	0.056	7.78%

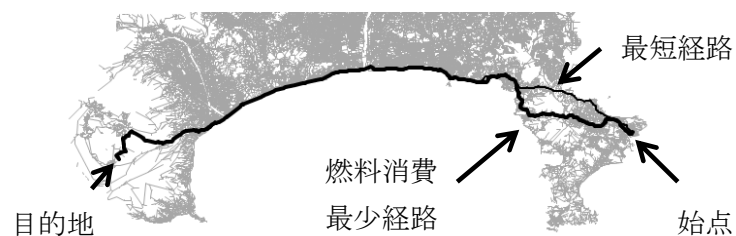


図 16 浦賀駅付近を始点とする各経路探索の経路

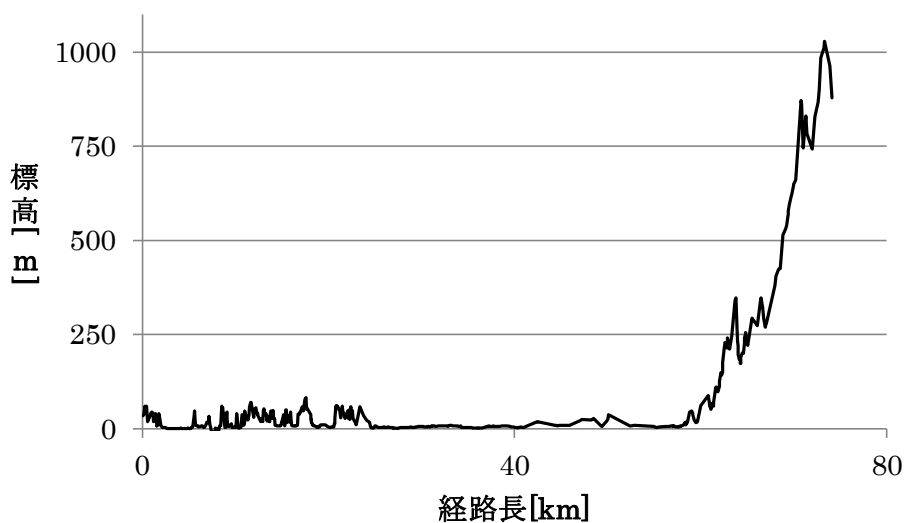


図 17 浦賀駅付近を始点とする最短経路の標高推移

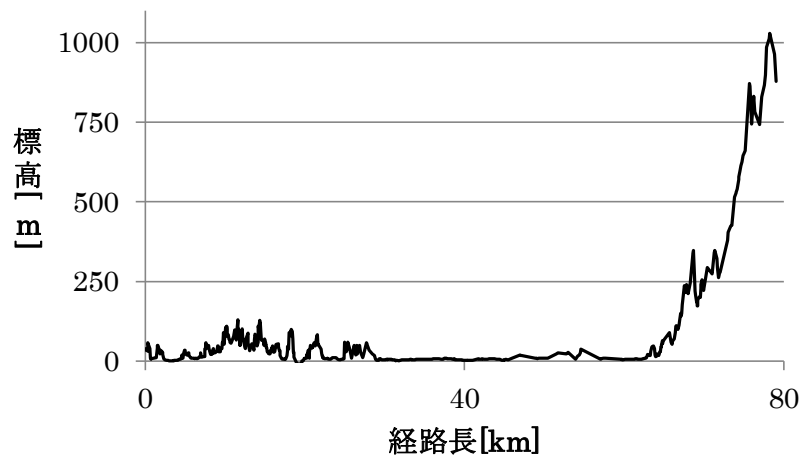


図 18 浦賀駅付近を始点とする燃料消費最少経路の標高推移

● 燃料消費量が最も減少した経路

燃料消費量が最も減少した経路の始点は、相模原市緑区牧野ふじの温泉病院付近のノードであった。表 7 にこのノードから目的地までの各種計算結果を示す。また、図 19 にこの経路探索の結果を、図 20 に最短経路の標高推移を、図 21 に燃料消費最少経路の標高推移をそれぞれ示す。

表 7 燃料消費量が最も減少した始点の各経路情報

最短経路 距離[km]	最短経路 消費量[L]	消費最少経 路距離[km]	消費最少 消費量[L]
80.77	4.721	90.29	3.595
延長距離 [km]	消費減少 量[L]	1km 当たりの 減少量[L/km]	節約率[%]
9.52	1.126	0.118	23.85

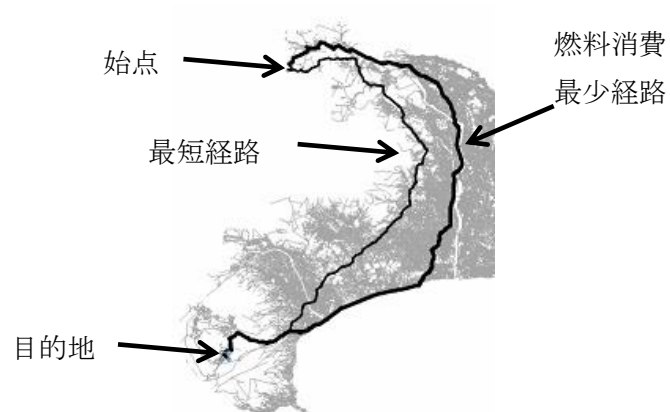


図 19 燃料消費量が最も減少した始点の各経路

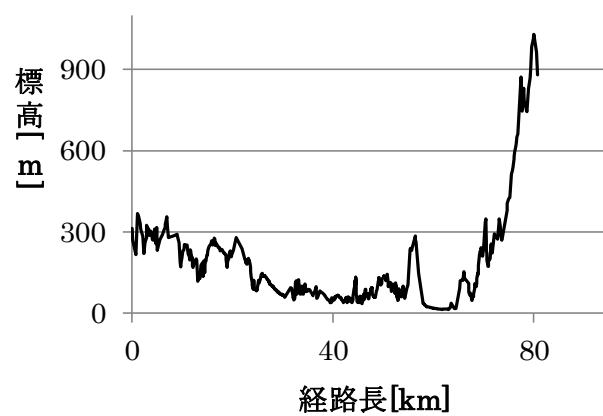


図 20 燃料消費量が最も減少した始点の最短経路の標高推移

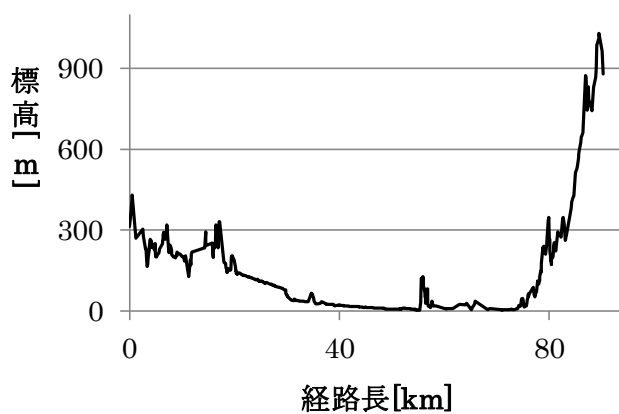


図 21 燃料消費量が最も減少した始点の燃料消費最少経路の標高推移



- 経路長が最も延長した経路

経路長が最も延長した経路の始点は、相模原市緑区牧野、牧野郵便局付近のノードであった。表 8 にこのノードから目的地までの各種計算結果を示す。また、図 22 にこの経路探索の結果を、図 23 に最短経路の標高推移を、図 24 に燃料消費最少経路の標高推移をそれぞれ示す。

表 8 距離が最も延長した始点の各経路情報

最短経路 距離[km]	最短経路 消費量[L]	消費最少経 路距離[km]	消費最少消費 量[L]
76.93	4.428	90.32	3.532
延長距離 [km]	消費減少 量[L]	1km 当たりの 減少量[L/km]	節約率[%]
13.39	0.896	0.067	20.23

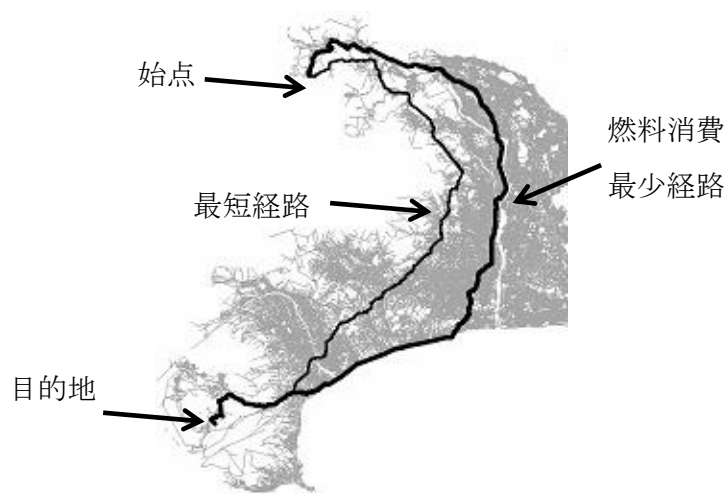


図 22 距離が最も延長した始点の各経路

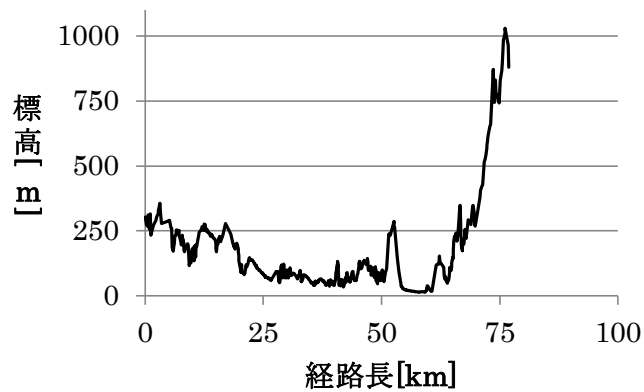


図 23 距離が最も延長した始点の最短経路の標高推移

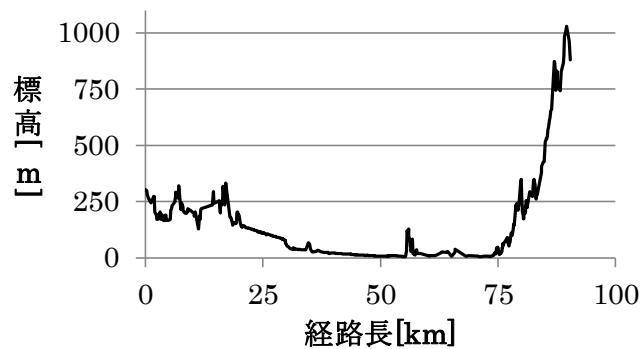


図 24 距離が最も延長した始点の燃料消費最少経路の標高推移

● 燃料消費を最も節約した経路

燃料消費を最も節約した経路の始点は、相模原市緑区中沢三嶋神社付近のノードであった。表 9 にこのノードから目的までの各種計算結果を示す。また、図 25 にこの経路探索結果を、図 26 に最短経路の標高推移を、図 27 に燃料消費最少経路の標高推移をそれぞれ示す。

表 9 節約率が最も良い始点の各経路情報

最短経路 距離[km]	最短経路 消費量[L]	消費最少経 路距離[km]	消費最少消費 量[L]
67.27	3.914	72.41	2.826
延長距離 [km]	消費減少 量[L]	1km 当たりの 減少量[L/km]	節約率[%]
5.14	1.088	0.212	27.80

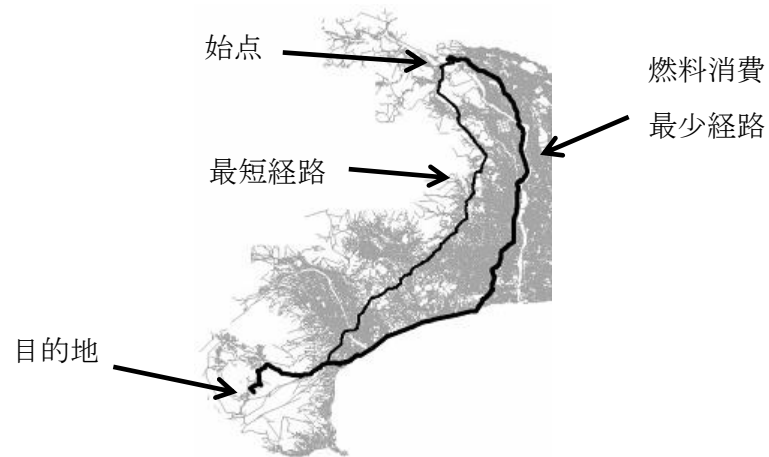


図 25 節約率が最も良い始点の各経路

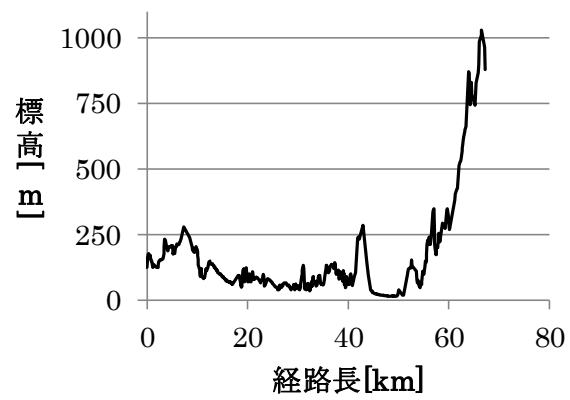


図 26 節約率が最も良い始点の最短経路の標高推移

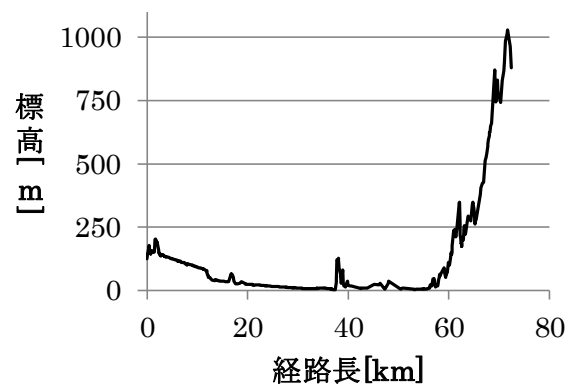


図 27 節約率が最も良い始点の燃料諸費最少経路の標高推移

● 延長距離 1km 当たりの燃料消費量の減少量が最も少ない経路

延長距離 1km 当たりの燃料消費量の減少量が最も少ない経路の始点は、小田原市根府川駅付近のノードであった。表 10 にこのノードから目的までの各種計算結果を示す。また、図 28 にこの経路探索結果を、図 29 に最短経路の標高推移を、図 30 に燃料消費最少経路の標高推移をそれぞれ示す。

表 10 延長距離 1km 当たりの燃料消費量の減少量が最も少ない始点の各経路情報

最短経路 距離[km]	最短経路 消費量[L]	消費最少経 路距離[km]	消費最少消費 量[L]
17.76	1.681	21.65	1.680
延長距離 [km]	消費減少 量[L]	1km 当たりの 減少量[L/km]	節約率[%]
3.89	0.001	0.00022	0.05

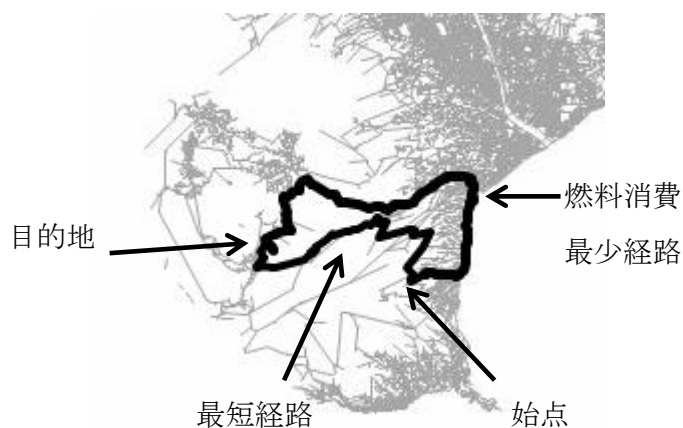


図 28 延長距離 1km 当たりの燃料消費量の減少量が最も少ない始点の各経路

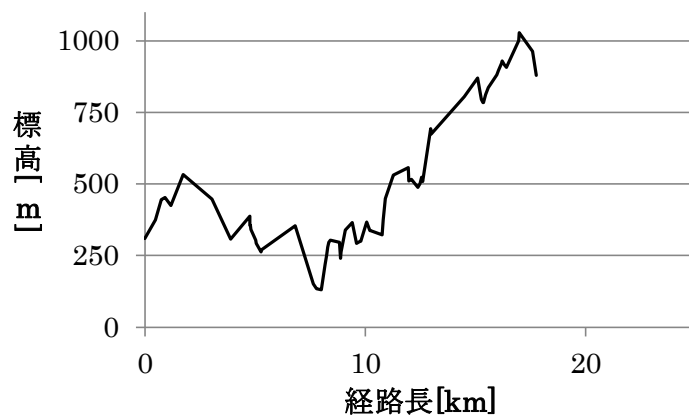


図 29 延長距離 1km 当たりの燃料消費量の減少量が最も少ない始点の最短経路の標高推移

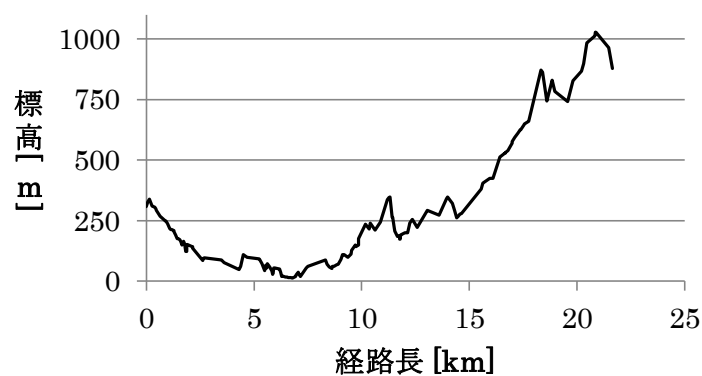


図 30 延長距離 1km 当たりの燃料消費量の減少量が最も少ない始点の燃料諸費最少経路の標高推移

- 最短経路と燃料消費最少経路が一致した経路で、経路長が最長の経路

最短経路と燃料消費最少経路が一致した経路の中で、経路長が最長となった小田原市星ヶ山付近のノードを始点とする経路を示す。表 11 に始点から目的までの各種計算結果を示す。また、図 31 にこの経路探索結果を、図 32 に経路の標高推移をそれぞれ示す。

表 11 最短経路と燃料消費最少経路が一致した経路の各情報

最短経路 距離[km]	最短経路 消費量[L]	消費最少経 路距離[km]	消費最少消費 量[L]
19.20	1.607	19.20	1.607

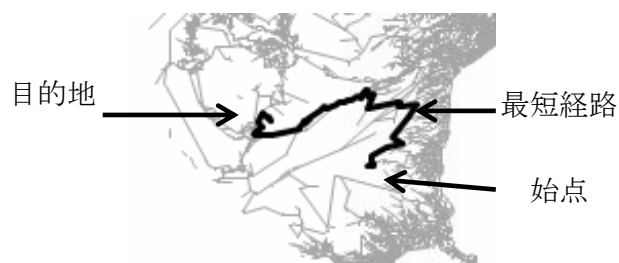


図 31 最短経路と燃料消費最少経路が一致した経路の探索結果

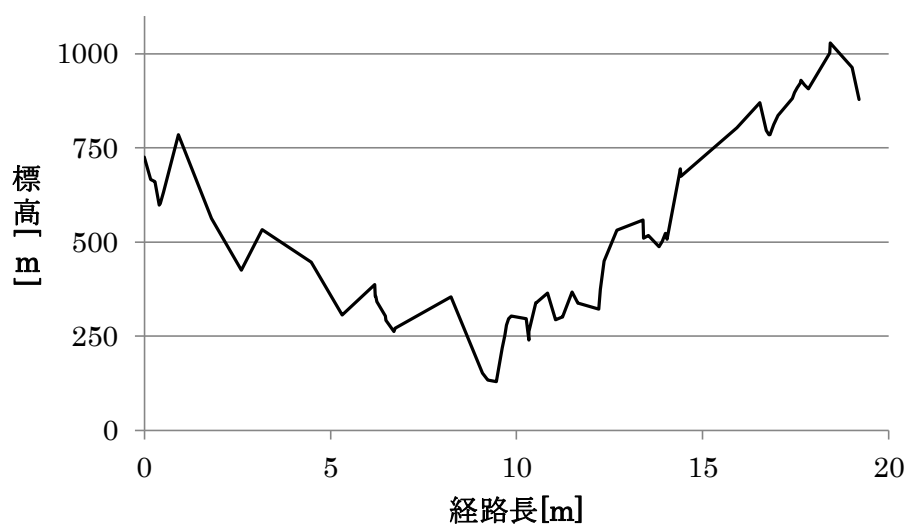


図 32 最短経路と燃料消費最少経路が一致した経路の標高推移

● 目的地から始点へ戻る経路

これまでに示した始点に、目的地から向かう場合の、経路長及び燃料消費量を表 12 に示す。各行の上段は、これまでに示した上二子山を目的地とする経路探索の結果を、下段は上二子山を始点とし、それぞれの目的地へ向かう経路探索の結果である。また、それぞれの経路を図 33 と図 34、図 35 に示す。

表 12 始点を目的地にした場合の各経路の情報  
(上段：上二子山が目的地 下段：上二子山が始点)

始点及び 目的地	最短経 路距離 [km]	最短経 路消費 量[L]	消費最 少距離 [km]	最少消 費量「L」	延長距 離[km]	減少燃 料量[L]	節約率 [%]
溝の口駅	79.34	3.507	83.16	3.234	3.82	0.273	7.78
		2.370	84.04	2.109	4.70	0.261	11.00
浦賀駅	74.08	3.571	79.05	3.293	4.97	0.278	7.78
		2.438	78.50	2.179	4.42	0.259	10.64
ふじの 温泉病院	80.77	4.721	90.29	3.595	9.52	1.126	23.85
		3.819	89.75	2.761	8.98	1.058	27.70
牧野 郵便局	76.93	4.428	90.32	3.532	13.39	0.896	20.23
		3.552	88.06	2.688	11.13	0.864	24.32
三嶋神社	67.27	3.914	72.41	2.826	5.14	1.088	27.80
		2.901	71.90	1.810	4.63	1.091	37.62
根府川駅	17.76	1.681	21.65	1.680	3.89	0.001	0.05
		0.810	21.60	0.733	3.84	0.077	9.51
星ヶ山	19.20	1.607	19.20	1.607	0.00	0	0.00
		1.308	23.65	1.218	4.45	0.091	6.92

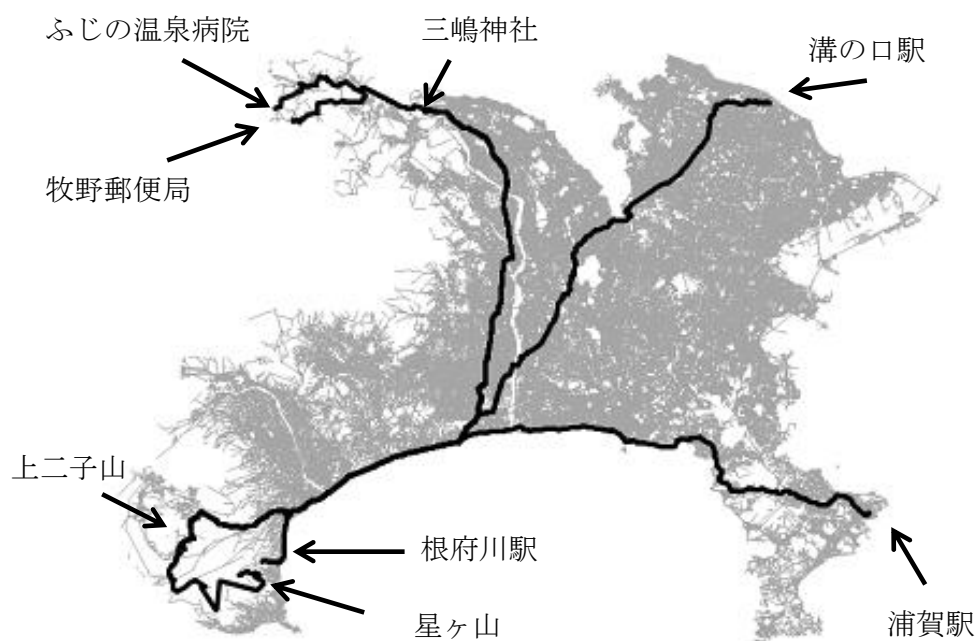


図 33 上二子山を出発地として各地に向かう燃料消費最少経路

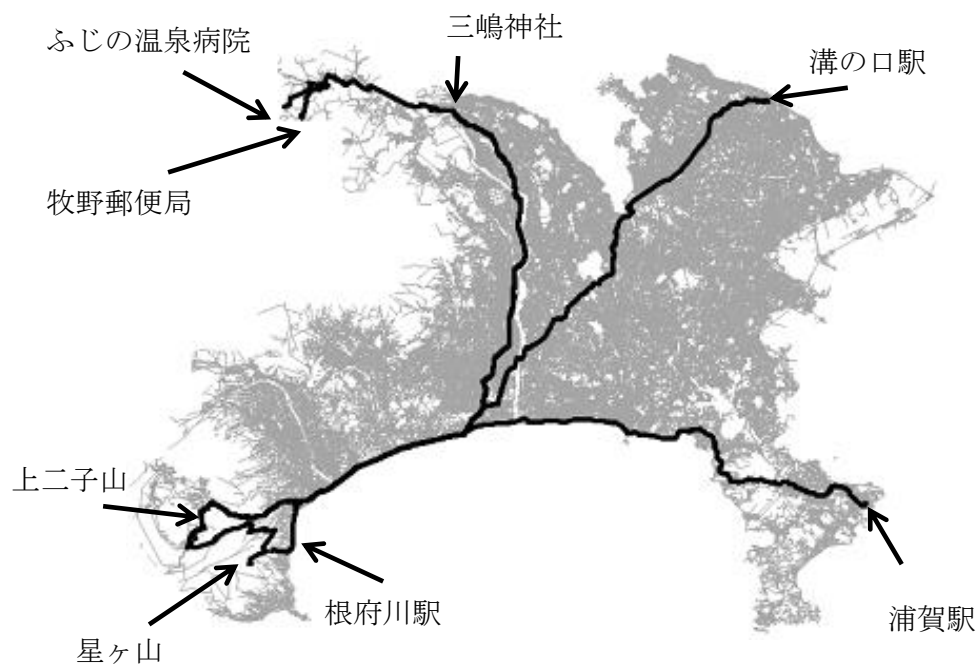


図 34 上二子山を目的地として上二子山に向かう燃料消費最少経路

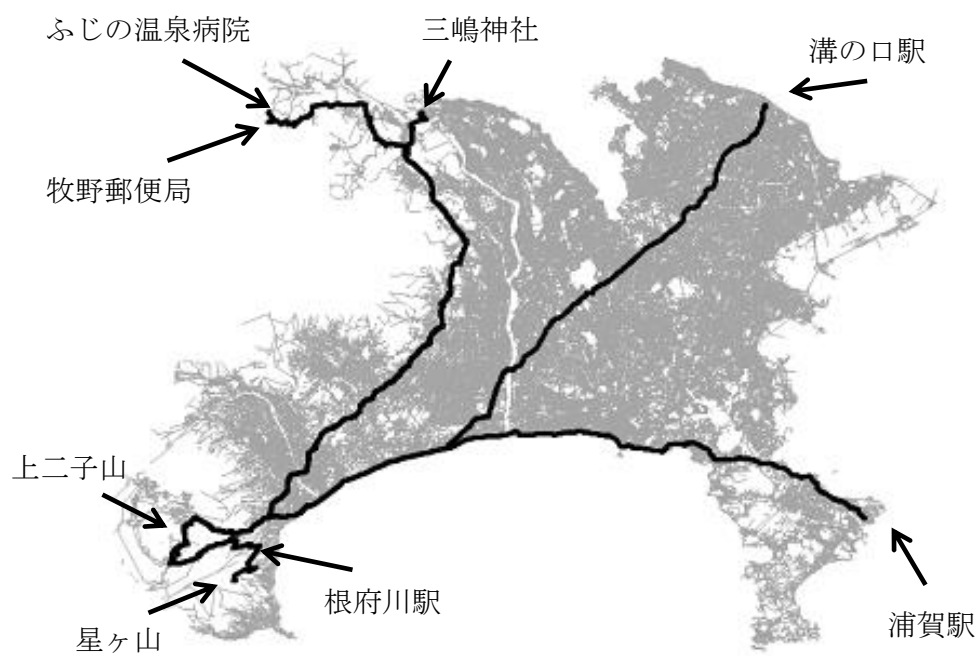


図 35 各ノード間の最短経路



## 6. 考察

- 作成した道路ネットワークについて

作成した道路ネットワークでは、表 3 のように道路勾配がないリンクが数多く見られた。これは、リンクの両端ノードが異なるメッシュにあるにもかかわらず、同じ標高値を持ってしまうリンクが多かったためであると考えられる。異なるメッシュが同じ標高値を持つ場合、平野などの高低差が少ない地形に道路が敷設されていると考えられる。図 12 から分かりますとおり、神奈川県は平地が多い地形であるため、このようにネットワークのおよそ半数のリンクに道路勾配がないということが起きたと考えられる。

- 標高推移について

最短経路の標高推移と、燃料消費最少経路の標高推移を比較すると、燃料消費最少経路の標高推移は、最短経路のものと比較して、上り下りの回数が少なくなっていることが見て取れる。特に、上りの道路勾配の使用する回数が減少している。これは、道路勾配が上り坂を示すときは、平坦時よりも燃料消費量が増加してしまうことから、上りの道路勾配を持つリンクを選択しなかったと考えられる。また、燃料消費最少経路は標高が徐々に低くなるような経路を選択しているように見える。これは下りの道路勾配を持つリンクを選択すると、平坦時よりも燃料消費量が減少することから、優先的にリンクが選択されたものであると考えられる。ただし、目的地は標高が高い位置にあるので、最終的には上りの道路勾配を持つリンクを選択している。

よって、燃料消費最少経路探索によって得られる経路は、目的地周辺を除き、標高が低い点に向かう経路になる傾向があると、標高推移の図から考えられる。

- 距離の延長について

各ノードペアの最短経路の長さ、燃料消費最少経路の長さを比較すると、延長される長さはノードペアによってばらつきがあるが、最大でおよそ 1.2 倍、平均ではおよそ 1.1 倍距離が延長されていることが分かる。これは、各経路の図からも分かる通り、最短経路を選択せず、目的地に対して遠回りとなる経路を選択しているためと考えられる。この経路の変化は、前項と同じく標高が低い経路を優先して選択したためであると考えられる。また、図 12 から燃料消費最少経路は最短経路よりも標高が低い経路を選択していることが分かる。したがって、燃料消費最少経路探索は、最短経路と比較して経路長が延長される。

- 燃料消費量の減少と選択される経路について

探索結果の各表からわかるように、最短経路と比較して燃料消費最少経路は、ノードペアによっては 5[km]以上走行距離を延長させているにもかかわらず、燃料消費を大幅

に減少させていることが分かる。これは、燃料消費が少ない下りの道路勾配を多く選択することによって、距離は延長されるが、その分燃料消費が少ないリンクを選択したため、燃料消費量が減少したと考えられる。また、図 34 を見ると、多くの経路が途中から同じ経路を選択していることが分かる。これは、燃料消費が少ないリンクが計算によって、あらかじめ決まってしまうためであると考えられる。したがって、他の多くの始点も、途中からこの経路を選択する可能性が非常に高いと考えられる。

- 延長した距離に対して、燃料消費量をあまり節約できない経路について

表 10 より、この経路では延長した距離に対して、燃料消費を減少量が少ないことが分かる。図 29 図 30 の標高推移を比較しても、燃料消費最少経路は最短経路と同じように、細かい上り下りを繰り返している。燃料消費最少経路の推移を見ても、下り坂が少なく、全体的に上り坂が多い経路になってしまっている。そのため、距離の延長に対して、その分上り坂を選択してしまっていると考えられ、燃料消費を減少させる効果が発揮できなかったと考えられる。また、最短経路の燃料消費量が燃料消費最少経路の燃料消費量とほぼ同じになっている。これは、最短経路の距離が短いため、最短経路の燃料消費量がとても少なくなり、代替となる経路の燃料消費量に近づいたものと考えられる。したがって、燃料消費最少経路探索は、ノードペアの距離が近い、もしくは燃料消費最少経路が上り坂を多く通るような経路である場合、十分な効果を発揮できないと考えられる。

- 最短経路と燃料消費最少経路が一致する場合について

表 11 や図 31 から分かる通り、経路探索の結果、最短経路と燃料消費最少経路が一致する場合がある。これは、最短経路の燃料消費量が燃料消費最少経路の燃料消費量と一致した場合に発生する。したがって、この場合は燃料消費最少経路探索によって、代替案となる経路を見つけることはできないということが分かる。

また、表 11 で示した経路は、今回の実験で最短経路と燃料消費最少経路が一致した経路の中で、経路長が最長のものである。そのため、最短経路の経路長がおよそ 20km 以下のとき、最短経路と燃料消費最少経路が一致する場合があると推測される。

- 出発地と目的地を入れ替えた場合について

表 12 から、最短経路距離以外の項目において、出発地と目的地を入れ替えた場合に数値が変化していることが分かる。最短経路においては、同じ経路をたどる場合でも、行きと帰りでは燃料消費量が変化している。これは、リンクへの進入方向によって、リンクで使用される燃料量が変わるためである。道路勾配があるリンクでは、一方向が上り勾配であれば、その反対方向は下り勾配となっているため、同じリンクを使用しても

燃料消費量が変化する．そのため，最短経路においても出発地と目的地を入れ替えた場合に燃料消費量に変化したと考えられる．

- 全ノードペアの減少量，節約率について

表4から，有効なノードペア全体の燃料消費の節約率は7.79[%]であることが分かり，節約できる燃料量は約 76,000[L]となった．また，燃料消費最少経路と最短経路が一致したノードペア数が，全体の 0.23[%]であることから，燃料消費最少経路探索は，多くの場合で最短経路よりも燃料消費が少ない経路を探索することができると考えられる．

## 7. おわりに

本研究では経路探索時に道路勾配を考慮することを目的として、二次元の道路ネットワークに標高値を与え、道路勾配を含んだ道路ネットワークの作成を行った。道路ネットワークと DEM データを重ね合わせ、DEM データの各メッシュの座標を計算することで、各ノードに標高値を与えることができ、ノードの標高差とリンクの長さを用いることで、リンクに道路勾配の情報を与えることができた。しかし、リンク間に標高差がなく道路勾配情報を与えられなかったリンクが数多くあったため、対象地域の選定や手法の改良が必要である。

また、作成した道路勾配を含んだ道路ネットワークを用いて、燃料消費最少経路探索を行った。道路勾配によって燃料消費量が増えるモデルを用いて、リンクごとの燃料消費量を計算した。目的地を一つに固定し、他の全始点からの燃料消費最少経路探索を行った結果、最短経路使用時の燃料消費量から全体で約 7.8[%]燃料消費を減少させることが分かった。また、最短経路と燃料消費最少経路が一致した割合が 0.23[%]であったため、燃料消費最少経路探索は、多くの場合で最短経路よりも燃料消費量が少ない経路を探索できることが判明した。

今後の課題として、よりメッシュ幅が細かい DEM データを用いることで、より精緻な実験が行えると考えられる。

## 参考文献

- [1] 総務省：「平成 26 年版 情報通信白書」，日経印刷，pp.224-225，2014.
- [2] 森津 秀雄：「坂道における交通シミュレーション」，流通科学大学論集—経済・情報・政策編—，Vol.21，No.2，pp.107-116，2013.
- [3] A. B. Schwarzkopf and, and R. B. Leipnik：「Control of highway vehicles for minimum fuel consumption over varying terrain」，Transportation Research, Vol.11，pp.279-286，1977.
- [4] 李 勇鶴，佐藤 俊明，岡部 篤行：「エコルート走行による自動車燃料消費量の削減に関する研究 —道路縦断勾配を考慮した瞬間燃費モデルを用いて—」，空間情報科学研究センター シンポジウム—CSIS DAYS2010—研究アブストラクト，p.44，2010.
- [5] M. A. S. Kamal, Masakazu Mukai, Junichi Murata, and Taketoshi Kawabe：「Ecological Vehicle Control on Roads With Up-Down Slopes」，IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.12，No.3，pp.783-794，2011.
- [6] 東明 佐久良：「完全図解 ビジュアル GIS」，オーム社，2002.
- [7] 橋本 雄一：「三訂版 GIS と地理空間情報—ArcGIS 10.2 とダウンロードデータの活用—」，古今書院，2014.
- [8] 国土交通省国土地理院：「数値地図ユーザズガイド 第 2 版補訂版」，日本地図センター，1998.
- [9] 松井 俊樹，菅沼 直樹：「縦断勾配を有する路面領域の抽出に関する研究」，日本機械学会論文集 C 編，Vol.77，No.782，pp.3737-3749，2011.
- [10] 伊理 正夫，白川 功，他 14 名：「演習グラフ理論-基礎と応用-」，コロナ社，pp.88-89，1983.
- [11] 安井 雄一郎，藤澤 克樹，鳥海 重喜，田口 東：「大規模最短路問題に対するダイクストラ法的高速化」，数理解析研究所講究録，Vol.1726，pp.62-72，2011.
- [12] 長尾 和彦：「Java データ構造とアルゴリズム 基礎講座」，技術評論社，2009.

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，法政大学大学院 理工学研究科 経営数理工学研究室 五島洋行 教授には，多くのご支援とご指導を賜りました．本論文を執筆することができたのは，五島洋行 教授のおかげです．ここに深く感謝申し上げます．

また，本研究について多くの助言を下さりましたサレジオ工業高等専門学校 情報工学科 数理モデル研究室 島川陽一 教授に心より感謝申し上げます．

本論文の副査を快く引き受けてくださった法政大学大学院 理工学研究科 信頼性工学研究室 木村光宏 教授にも感謝申し上げます．

経営数理工学研究室の皆様には，研究に関する数多くのアイデア，アドバイスをいただきました．ここに感謝申し上げます．

最後に，多方面で支えていただきました家族に感謝の意を申し上げます．ありがとうございました．